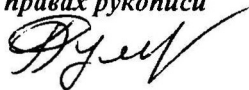


0. 785096

*На правах рукописи*



ГУМЕРОВА ГУЗЕЛЬ ХАЙДАРОВНА

**ОЧИСТКА КРУПНОТОННАЖНЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ  
В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ С ПОРИСТЫМИ  
ВРАЩАЮЩИМИСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

***АВТОРЕФЕРАТ***

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет» на кафедре «Оборудование пищевых производств».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Николаев Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Лалтев Анатолий Григорьевич

кандидат технических наук,  
Мухаметзянова Асия Габдулмазитовна

Ведущая организация: Уфимский государственный нефтяной  
технический университет

Защита диссертации состоится 26 ноября 2010 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68 (зал заседаний учёного совета), А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан 22 октября 2010 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

С.И. Поникаров



**Актуальность работы.**

В настоящее время все более остро встает проблема очистки крупномасштабных газовых выбросов химических, нефтехимических и смежных с ними промышленных предприятий от химических и экологически вредных примесей, в том числе - парниковых газов (диоксид углерода, метан, окислы азота, и др.). Особое внимание уделяется очистке газовых выбросов от диоксида углерода.

Однако используемое в настоящее время очистное оборудование промышленных предприятий не может обеспечить очистку крупнотоннажных газовых выбросов (млн. м<sup>3</sup> в час), в силу своей низкой пропускной способности по газовой фазе (не более 1,5-2,0 м/с).

В связи с этим представляется целесообразным применение для указанных целей полых вихревых аппаратов, скорость газа в которых достигает 20-25 м/с. Полые вихревые аппараты обладают малым гидравлическим сопротивлением и развитой межфазной поверхностью, достигаемой за счет тонкого распыления жидкости. Вместе с тем, практически все распыливающие устройства создают полидисперсный факел жидкости, что существенно осложняет их промышленную реализацию.

Поэтому разработка диспергирующих устройств, обеспечивающих практически монодисперсное распыление жидкости, является актуальной задачей, решение которой будет способствовать быстрейшему промышленному применению полых вихревых аппаратов.

**Цель работы и основные задачи исследования.**

Цели работы заключались в экспериментальном и теоретическом исследовании гидродинамики и массообмена в полых вихревых аппаратах с пористыми вращающимися распылителями (ПВР) применительно к решению проблемы эффективной очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий.

В непосредственные задачи исследования входило:

- экспериментальное исследование дисперсного состава жидкости, распыленной пористыми вращающимися распылителями с различным средним размером диспергирующих элементов в широком диапазоне нагрузок по жидкости и чисел оборотов ротора;
- разработка методики расчета траектории капель в полых вихревых аппаратах с ПВР;
- экспериментальное исследование процесса физической сорбции диоксида углерода каплями жидкости по радиусу аппарата и пристенной пленке жидкости и сопоставление полученных результатов с известными моделями массопереноса в каплях;
- разработка математического описания процесса химической сорбции диоксида углерода и технологической схемы процесса.

---

\* работа выполнена под руководством к.т.н. Дмитриева А.В.

### **Научная новизна работы.**

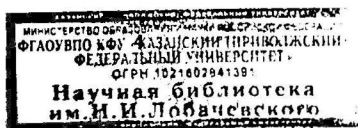
1. Выполнено экспериментальное исследование гранулометрического состава жидкости при распылении её пористыми вращающимися распылителями (ПВР) при различной структуре поверхности распылителей и скорости их вращения. Проведено сопоставление полученных результатов с дисперсным составом жидкости при использовании других типов распыливающих устройств.
2. Представлен численный метод решения системы уравнений, описывающих динамику капель в объеме полого вихревого аппарата с ПВР.
3. Впервые в аппаратах с ПВР проведено экспериментальное исследование процесса физической сорбции диоксида углерода каплями жидкости по радиусу аппарата, а также в пристенной пленке жидкости и сопоставление полученных результатов с известными моделями массопереноса в каплях.
4. Выполнено математическое описание процесса химической сорбции диоксида углерода раствором метилдиэтанолamina (МДЭА) и технологической схемы процесса.

**Практическое значение работы.**

- Предложен полый вихревой аппарат с пористыми вращающимися распылителями (защищен патентом РФ № 76576, Бюллетень № 27 27.09.2008), обладающий большой пропускной способностью по газовой фазе, низким гидравлическим сопротивлением и малыми капитальными затратами, обеспечивающий практически монодисперсное распыление поглотителя.
- Предложена технология очистки крупнотоннажных газовых выбросов от диоксида углерода в полых вихревых аппаратах с ПВР раствором МДЭА.
- Разработана инженерная методика расчета и проектирования аппарата с ПВР, обеспечивающая заданную степень очистки промышленных газов от диоксида углерода.

**На защиту выносятся:**

- Результаты экспериментального исследования дисперсного состава жидкости, распыленной пористым вращающимся распылителем диаметром 50мм с различной структурной поверхностью (ПВР 250, ПВР 400) при различных скоростях вращения ротора и скоростях газовой и жидкой фаз.
- Сопоставление дисперсной структуры потока жидкости с результатами, полученными при исследовании других распыливающих устройств.
- Численное исследование траекторий движения капель жидкости в полых вихревых аппаратах с ПВР
- Впервые получены результаты экспериментального исследования процесса физической сорбции диоксида углерода в широком диапазоне нагрузок как в условиях дисперсного, так и пленочного течения жидкости. Установлен эффект влияния на массоперенос удара капель о пленку жидкости и предложено его математическое описание.
- Математическое описание процесса химической сорбции диоксида углерода раствором метилдиэтанолламин (МДЭА) и технологическая схема процесса.





**Личное участие.** Все результаты работы получены Гумеровой Г.Х. под руководством д.т.н., профессора Николаева Н.А. и к.т.н. Дмитриева А.В.

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты докладывались и обсуждались на V-й Международной научно-технической конференции «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2008)», г. Уфа, 2008; IX-й Международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии», г. Казань, 2008; Второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология», Казань, 2008.

**Публикация работы.** По теме диссертационной работы опубликовано 10 статей, из них 3 в журналах, соответствующих перечню ВАК, 1 патент Российской Федерации № 76576. Опубликовано: 27.09.2008 Бюллетень № 27.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, содержащих основные результаты исследования, выводов по работе и списка литературы, составляющего 92 источника. Работа изложена на 114 страницах, содержит 50 рисунков и 11 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснован выбор высокоэффективного оборудования для целей очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий от химически и экологически опасных компонентов, определены цель и задачи исследования.

**В первой главе** приводится критический анализ литературных и патентных источников, касающихся способов распыливания жидкости и получения объемного равномерного факела распыла монодисперсной структуры. Наиболее перспективны для этих целей полые вихревые аппараты с диспергированием жидкой фазы, работающие при скоростях газа 20-25 м/с.

Высокая среднерасходная скорость газа, сочетающаяся с низким гидравлическим сопротивлением, позволяет эффективно использовать их при очистке крупнотоннажных газовых выбросов.

Однако, полые вихревые аппараты не получили широкого распространения из-за низкого качества работы механических распылителей жидкости (форсунок), не обеспечивающих равномерного распределения жидкости в объеме аппарата и характеризующихся широким спектром размеров капель, что существенно осложняет их проектирование и расчет.

В связи с этим представляется перспективным использование в полых вихревых аппаратах пористых вращающихся распылителей (ПВР) жидкости, выполненных в виде цилиндрических стаканов из пористого материала с близкими по размерам частицами, образующими их наружную поверхность.

Каплеобразование на поверхности ПВР происходит на границе материала. Размеры капель определяются размерами частиц пористого материала и окружной скоростью вращения распылителя.

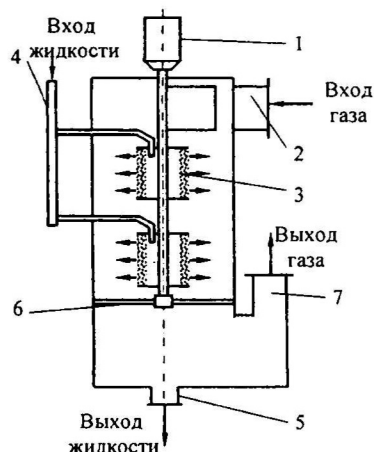


Рис. 1. Вихревой аппарат с пористым вращающимся распылителем:  
1 – двигатель; 2 – штуцер для входа газа; 3 – пористые вращающиеся распылители; 4 – узел распределения жидкости; 5 – штуцер для выхода жидкости; 6 – опора подвеса вала; 7 – штуцер для выхода газа.

Схема полого вихревого аппарата с использованием пористых вращающихся распылителей представлена на рис.1.

Такие устройства позволяют получить равномерный по высоте аппарата факел распыленной жидкости с высокой степенью монодисперсности.

**Во второй главе** дается сравнительная характеристика пористых материалов с высокими значениями пористости и прочности, что обуславливает высокую пропускную способность распылителя, и возможность использования высоких скоростей вращения ротора. Кроме того, необходимыми требованиями являются стойкость к агрессивным средам, температуростойкость и экономичность.

**В третьей главе** Предшествующие исследования составляющих скорости двухфазного потока в ПВР показали (рис.2), что введение в поток газа дисперсной фазы оказывает существенное влияние на его структуру и приводит к значительному снижению тангенциальной составляющей скорости, а также гидравлического сопротивления.

Профиль осевой скорости газа при увеличении расхода дисперсной фазы постепенно изменяется и приближается к форме, характерной для осевого течения в кольцевом канале. Профили относительной осевой, тангенциальной составляющих скорости газа и статического давления совпадают при одинаковых отношениях массовых расходов жидкости и газа ( $L_m/G_m = \text{const}$ ), а изменение скорости истечения жидкости из отверстий оросителя практически не оказывает влияния на структуру газового потока.

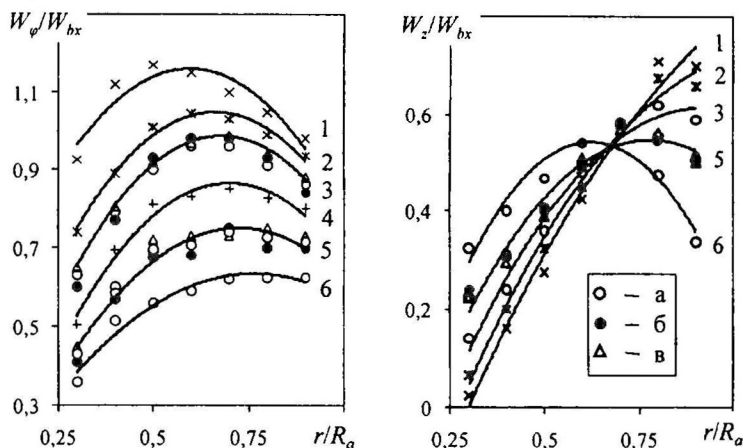


Рис. 2. Профили тангенциальной и осевой скорости газа в условиях двухфазного течения:  $D_a = 100$  мм;  $l/D_a = 2,85$ ;  $A = 2,17$ ;  $W_{ax}$ , м/с: а – 15; б – 20; в – 25;  $L_n/G_m$ , кг/кг: 1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 1,6; 5 – 0,8; 6 – 1,6.

Сопоставление результатов, полученных в аппаратах различного диаметра, показало полное совпадение относительных компонент скорости в сходственных геометрических точках моделей как в случае однофазного, так и двухфазного течения при равенстве отношения  $L_n/G_m$ , что свидетельствует о возможности переноса результатов исследования лабораторной модели на промышленный объект с достаточной степенью точности.

**В четвертой главе** рассматриваются режимы работы ПВР. Между этими режимами распыливание носит смешанный характер, а именно: пленочно-струйный, струйно-капельный. Переход от одного режима распыливания к другому происходит постепенно и определяется режимами работы распылителя, физическими свойствами распыливаемой жидкости и структурными характеристиками распыливающего элемента.

**I режим** существует при окружных скоростях вращения ротора до 0,8-1,2 м/с. При этом под действием силы тяжести жидкость в виде пленки стекает с поверхности диспергатора к его нижней образующей и скапливается на ней в виде жидкого валика, равновесие которого определяется взаимодействием сил поверхностного натяжения, тяжести и центробежной.

**II режим** При скоростях вращения  $> 8$  м/с наступает струеобразование на зернах с постепенным уменьшением длин струй и их диаметра.

Струйный режим во всем диапазоне существования характеризуется достаточно широким спектром образуемых в результате распада капель.

**III режим** - каплеобразование на зерне - наступает для образцов ПВР-400 при скоростях вращения порядка 12 м/с, а для ПВР-250 - при более низких 8-10 м/с. Соответственно, расход жидкости на одном зерне у ПВР-400 больше, и для достижения этого режима требуется большая центробежная сила.

Переход от одного режима к другому при работе ПВР из абразивного материала, или от одного механизма каплеобразования к другому, зависит от взаимодействия питающего отверстия (поры) и распыливающего элемента (зерна). Отсюда следует, что в анализе работы ПВР существенно выявление границы или граничной области, характеризующейся третьим режимом работы ПВР.

По сравнению с другими диспергирующими устройствами (скруббер Вентури и полый вихревой аппарат), ПВР позволяет осуществлять распыливание на капли, находящиеся в достаточно узком диапазоне размеров, что иллюстрируется графиками (рис.3, 4) и фотографиями (рис.5,6).

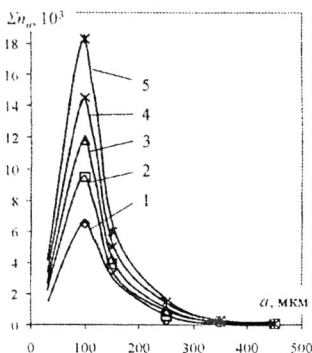


Рис. 3. Влияние расхода жидкости распылителя на характер распределения капель по размерам,  $G_f$ , м³/с: 1 – 21,5; 2 – 40,8; 3 – 54,3; 4 – 64,5; 5 – 86;

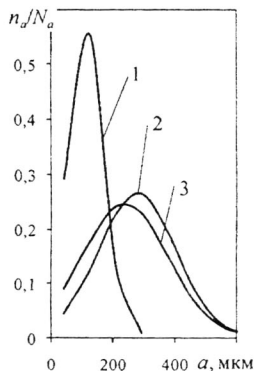


Рис. 4. Относительные частотные кривые распределения капель по размерам  $L_m/G_m = 1$  кг/кг;  $W_{ep} = 20$  м/с: 1 – полый вихревой аппарат с пористыми вращающимися распылителями; 2 – полый вихревой аппарат с полидисперсным распыливанием; 3 – скруббер Вентури.

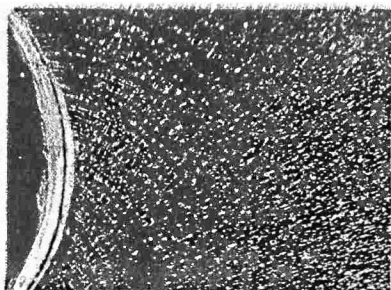


Рис. 5. Режим монодисперсного распыливания ПВР-250

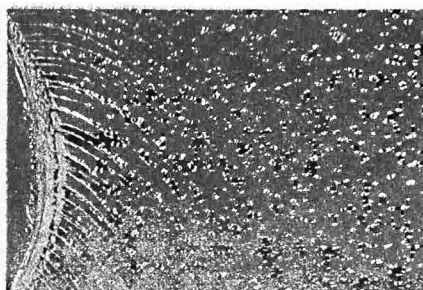


Рис. 6. Режим монодисперсного распыливания ПВР-400

Опыты с изменением физических свойств распыленной жидкости показали, что для третьего режима справедлива зависимость для диаметра капли, образующейся на конце капилляра в поле силы тяжести. В виде, интерпретированном для поля центробежной силы, она имеет вид

$$a_{32} = 0,52 \sqrt{\frac{6d_3\sigma}{\rho_L R \omega_p^2}} \quad (1)$$

где 0,52 – опытный коэффициент, учитывающий изменение величины результирующей сил поверхностного натяжения для случая каплеобразования на зерне.

Существенное влияние на движение капель оказывает сила аэродинамического сопротивления, сила тяжести и сила, вызванная градиентом скорости газового потока. С учетом перечисленных сил система уравнений, описывающая динамику капель, запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[ \frac{3}{4} c_a \frac{U_{i0}}{a} (W_r - U_r) + \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} (W_\varphi - U_\varphi) + \frac{\partial W_z}{\partial r} (W_z - U_z) \right], \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_\varphi U_r}{r} + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[ \frac{3}{4} c_a \frac{U_{i0}}{a} (W_\varphi - U_\varphi) - \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} (W_r - U_r) \right], \\ \frac{dU_z}{d\tau} &= g + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left[ \frac{3}{4} c_a \frac{U_{i0}}{a} (W_z - U_z) - \frac{\partial W_z}{\partial r} (W_r - U_r) \right], \\ \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{U_\varphi}{r}, \quad \frac{dz}{d\tau} = U_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_{om}$  – относительная скорость капель.

Решение системы уравнений (2) выполнялось численно четырехшаговым методом Рунге-Кутты с начальными условиями

$$\tau = 0, r = R_p, \varphi = 0, z = 0, U_r = 0, U_\varphi = \frac{2\pi n R_p}{60}, U_z = 0 \quad (3)$$

Расчеты проводились при  $R_a = 50$  мм,  $a_{32} = 100$  мкм. Для создания третьего (рабочего) режима ПВР необходимо, чтобы число оборотов ПВР превышало 3000 об/мин. Относительный расход жидкости изменялся от 0 до 1,8 кг/кг. Скорость газа на входе в аппарат изменялась от 5 до 45 м/с.

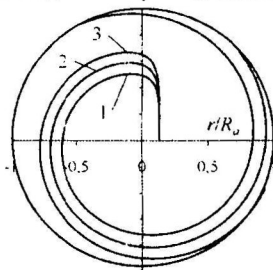


Рис. 7. Траектории капель в зависимости от числа оборотов ПВР при прямом вращении  $W_{ax} = 10$  м/с;  $L_m/G_m = 1,6$  кг/кг;  $a \approx 1-70$  мкм; 2-100 мкм; 3-130 мкм

При достаточно больших скоростях газового потока время полета капли практически не зависит от числа оборотов ПВР. Из рис. 7 можно заметить, что сначала капля движется практически по прямой линии, причем, чем выше обороты ПВР, тем длиннее эта прямая. Следовательно, первая часть пути капли определяется ее начальной скоростью, а затем траекторию капли определяет газовый поток. При достаточно больших оборотах ПВР капля движется по прямой линии, вплоть до стенки аппарата. В этом случае капля имеет максимальную скорость и минимальное время контакта.

**В пятой главе** рассмотрен массоперенос между каплями жидкости и потоком газа в полых вихревых аппаратах с ПВР на примерах физической сорбции в системе  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  на экспериментальной установке (рис. 8).

Пробы жидкой фазы в объеме аппарата отбирались изокINETическим зондом, а содержание двуокиси углерода определялось стандартными газоанализаторами.

Физическая сорбция исследовалась при следующих параметрах: расход воздуха изменялся в диапазоне 5-15 м/с, расход воды – 0,7-3,5 м<sup>3</sup>/ч, скорость вращения ПВР – 9-14 м/с. В этих условиях среднестатистический размер капель жидкости составлял 130-150 мкм при разбросе  $a_{\text{max}}^{12} / a_{\text{min}}^{12} < 2$ . Все исследования проводились при постоянных температурах воздуха и воды –  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Воздух, во избежание испарения капель, насыщался паром до относительной влажности  $\approx 100\%$ .

Результаты исследования показали, что в полном вихревом аппарате с ПВР наблюдаются две последовательные стадии массопереноса: при движении капель к периферии аппарата и при стекании жидкости по его внутренней стенке. Изменение концентрации двуокиси углерода в жидкости по радиусу аппарата показано на рис.9.

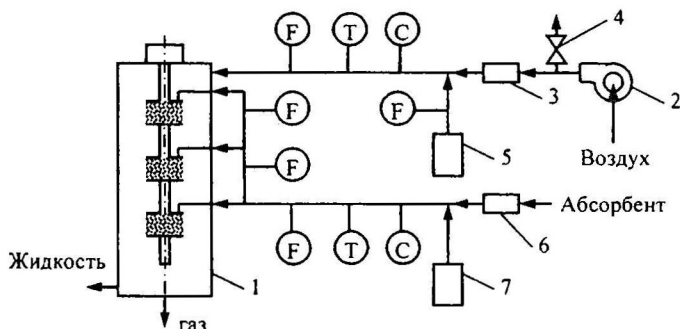


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: 1 – аппарат; 2 – вентилятор высокого давления; 3, 6 – термостаты; 4 – ресивер; 5 – ввод диоксида углерода; 7 – ввод абсорбента. Места измерения параметров воздуха и абсорбента: F – расход; T – температура; C – концентрация.

Оценка механизма массопереноса в каплях жидкости осуществлялась по двум моделям:

1. Модель Ньюмена, предполагающая отсутствие конвективного массопереноса внутри каплей.

$$A_i = 1 - \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{4Dt}{a_{32}^2}\right) \quad (4)$$

2. Модель Кронига-Бринка, учитывающая как молекулярный перенос вещества в капле, так и конвективный перенос вдоль линий тока.

$$A_i = 1 - \frac{3}{8} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-64 \lambda_n) \frac{Dt}{a_{32}^2} \quad (5)$$

где  $A_i = \frac{C_0 - C}{C_0 - C_p}$  – степень извлечения;  $C_0$ ,  $C$ ,  $C_p$  – начальная, текущая и равновесная концентрации двуокиси углерода в каплях, мг/л;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии капли, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $t$  – время контакта, с;  $a_{32}$  – среднестатистический диаметр капли,  $B_n$  и  $\lambda_n$  – собственные коэффициенты уравнений.

Коэффициенты массопереноса в каплях рассчитывались по уравнению Геддеса:

$$\beta = \frac{a_{32}}{6t} \ln(1 - A_i) \quad (6)$$

Полученные экспериментальные значения коэффициентов массопереноса в каплях были сопоставлены с рассчитанными по уравнениям 4-6 рис. 10.

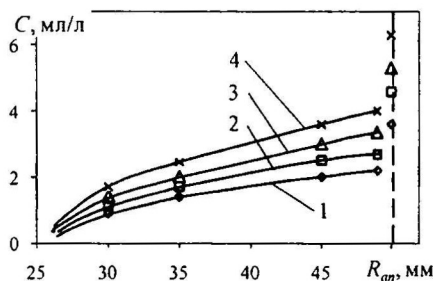


Рис. 9. Изменение концентрации диоксида углерода по радиусу аппарата при расходе жидкости 2,12 м<sup>3</sup>/ч и среднерасходной скорости газа л/с: 1 – 8,12; 2 – 12,7; 3 – 15,2; 4 – 20,7.

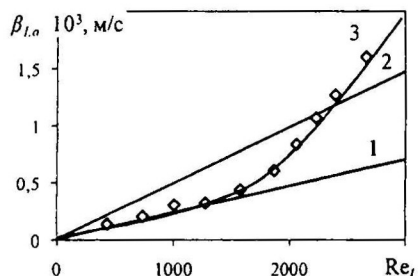


Рис. 10. Зависимость коэффициента массопереноса в каплях жидкости от числа Рейнольдса  $Re$ : 1 – модель Ньюмена; 2 – модель Кронига-Бринка; 3 – экспериментальные данные.

Поскольку значения чисел  $Re$  капель жидкости в исследованной области нагрузок по газу и скорости вращения ПВР не превышают 2000, в каплях имеет место исключительно диффузионный механизм переноса массы, соответствующий модели Ньюмена.

Сравнение экспериментальных значений коэффициентов массоотдачи в пленке с рассчитанными по известным соотношениям для прямоочного движения газа и пленки жидкости показали систематическое завышение опытных данных на 15-20% (таблица 1).

Очевидно, этот эффект вызван дополнительной интенсификацией массообмена за счет ударов капель о поверхность пленки жидкости. Для оценки влияния этого эффекта была использована математическая модель, учитывающая взаимодействие капель с поверхностью пленки.

Таблица 1.

Сопоставление опытных и рассчитанных значений коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости.

Расход жидкости, м <sup>3</sup> /час	Коэффициенты массоотдачи, $\beta \times 10^{-3}$ м/с		
	Опыт	Расчет	
		**без учета удара капель	с учетом удара капель
0,72	0,19	0,175	0,185
1,36	0,22	0,185	0,212
2,12	0,226	0,191	0,223
2,83	0,230	0,194	0,225
3,47	0,237	0,202	0,231

Модель рассматривает взаимодействие капли жидкости диаметром  $a$  и массой  $m_a$ , обладающей кинетической энергией  $E_a$ , с поверхностью пленки. При взаимодействии кинетическая энергия капли преобразуется в кинетическую энергию возмущения поверхности и потенциальную энергию новой поверхности, согласно уравнению:

$$E_a = \frac{\pi R^2 \rho_l \delta}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \pi R^2 \sigma + \varepsilon E_a \quad (7)$$

В безразмерном виде уравнение (4) имеет вид:

$$\eta^2 \left[ A^2 \left( \frac{d\eta}{dT} \right)^2 + B^2 \right] = 1 - \varepsilon \quad (8)$$

где  $A^2 = \frac{\pi R^2 \rho_l \delta}{2E_a} \left( \frac{R}{T} \right)^2$ ;  $B^2 = \frac{\pi R^2 \sigma}{E_a}$ ;

Взаимодействие одиночной капли с поверхностью пленки вызывает полное перемешивание жидкости на радиусе  $R$ . При потоке  $n$  капель, оседающих на 1 м<sup>2</sup> поверхности, возможны два режима:

режим 1 — поток капель мал: отдельные зоны возмущения не перекрываются последующими. В этом случае доля поверхности пленки, подвергающаяся возмущению, за время  $T$  составит:

$$\gamma_f = \pi R^2 T n < 1, \quad (9)$$

режим 2 — поток капель интенсивен; отдельные зоны возмущения накладываются друг на друга, причем последующие капли прерывают эффект перемешивания предыдущих. Возмущенной оказывается вся поверхность.

$$\gamma_f = \pi R^2 T n = 1. \quad (10)$$

Связь площади возмущенной поверхности с исходными параметрами имеет вид:

$$\gamma_f = \pi R^2 T n = \frac{n}{\sigma^2} \sqrt{E_a^3 (1 - \varepsilon)^3} \rho_l \delta. \quad (11)$$

\*\*Н.А.Николаев; Л.П. Холпанов; В.А. Малюсов; Н.М. Жаворонков ж. ТОХТ №5, 1989, с.563.



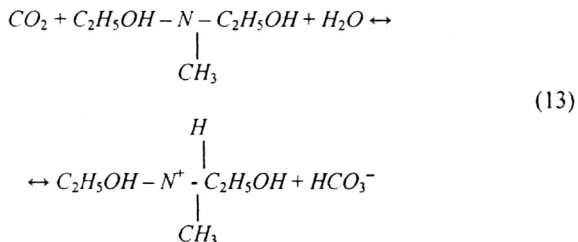
Суммарное значение коэффициентов массоотдачи в пленке жидкости при её взаимодействии с каплями будет зависеть как от конвективного массообмена в пленке, так и от воздействия капель на её перемешивание:

$$\beta_s = (1 - \gamma_\ell)\beta' + \gamma_\ell\beta'' \quad (12)$$

Результаты расчета по уравнению (12) показали, таблица 1, что при ударе капля поверхность пленки жидкости коэффициенты массоотдачи увеличиться на 8-15%.

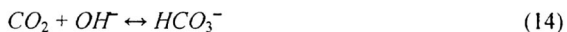
В шестой главе закономерности процесса химической сорбции изучались на примере поглощения  $CO_2$  метилдиэтанолмином (МДЭА).

Механизм химической реакции МДЭА при поглощении  $CO_2$  водным раствором МДЭА:



МДЭА сначала служит катализатором диссоциации воды:  $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ .

Диссоциированная вода (её гидроксильная группа  $\text{OH}^-$ ), взаимодействуя с  $\text{CO}_2$ , образует водорастворимый ион угольной кислоты ( $\text{HCO}_3^-$ )



Параллельно протекающими необратимыми реакциями можно пренебречь. Следовательно, скорость хемосорбции будет определяться реакцией (13), поскольку она равновесна.

Таким образом, скорость реакции  $CO_2$  с МДЭА зависит в основном от его щелочности (определяется по наличию группы  $OH^-$ , или  $pH > 7$ ).

Константа Генри для системы вода- $CO_2$ , Па·м<sup>3</sup>/моль:

$$E_{CO_2} = 2,82 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{2044}{T}\right) \quad (15)$$

Константа скорости реакции МДЭА- $H_2O-CO_2$ ,  $m^3/(кмоль \cdot с)$ :

$$\lg k_2 = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (16)$$

Учитывая особенности работы полого вихревого аппарата, коэффициент ускорения хемосорбции в пленке  $\gamma = 1$ .

В основе предлагаемой методики лежит представление о том, что:

- поглощаемый компонент мгновенно реагирует с активной частью хемосорбента  $OH^-$ ;
- при протекании реакции в массе жидкости на 1 моль  $CO_2$  расходуется 2 моля  $OH^-$ .

Растворимость МДЭА в расчетах принимается равной  $4 \text{ кмоль/м}^3$ ; исходя из этого избыток ионов  $OH^-$  равен  $4 \text{ кмоль/м}^3$ .

При разработке математического описания в контактной зоне вихревого аппарата был выделен элемент объема высотой  $d\xi$ , и поперечным сечением, равным поперечному сечению рабочей зоны аппарата. Количество жидкости, поступающей из оросителя в выделенный элемент,

$$dL_v = L_v l(\xi) d\xi \quad (17)$$

Материальный баланс для этого элемента (рис. 11):

$$-\frac{dy}{d\xi} = \frac{dM_d}{G_v d\xi} + \frac{dM_f}{G_v d\xi} \quad (18)$$

Начальная концентрация поглощаемого компонента в жидкости, поступающей на орошение аппарата, равна начальной концентрации активной части хемосорбента, но с противоположным знаком ( $x_d = -x_{B0}$ ). Следовательно, количество вещества, переходящее через поверхность капель монодисперсного распыла в выделенном элементе контактной зоны

$$dM_d = Ll(\xi)(x_d + x_{B0})d\xi \quad (19)$$

Здесь  $x_d + x_{B0}$  – изменение концентрации поглощаемого компонента в капле.

После преобразования было получено

$$\frac{dM_d}{G_v d\xi} = \frac{\rho_G}{\rho_L} \frac{L_m}{G_m} l(\xi)(x_d + x_{B0}) \quad (20)$$

Поскольку концентрация поглощаемого компонента в капле  $x_d$  может иметь отрицательные значения ее необходимо определять на базе зависимостей:

$$\frac{dx_d}{d\tau} = \frac{6}{a} K_{Ld} \left( \frac{y}{m} - x_d \right) \quad \text{при } x_d > 0, \quad (21)$$

$$\frac{dx_d}{d\tau} = \frac{6}{am} K_{Ld} y \quad \text{при } x_d < 0, \quad (22)$$

где  $\frac{1}{K_{Ld}} = \frac{1}{\gamma\beta_{La}} + \frac{1}{m\beta_{Ga}}$  – коэффициент массопередачи для капли с учетом протекания химической реакции;  $\gamma$  – коэффициент ускорения массопередачи, обусловленный протеканием реакции.

В пленке жидкости был выделен кольцевой элемент высотой  $d\xi$  и поперечным сечением, равным поперечному сечению пленки. Материальный баланс для выделенного элемента (рис. 11) запишется

$$L_{vj}x_f + dM_f + \bar{x}_d dL_v = (L_{vj} + dL_v)(x_f + dx_f), \quad (23)$$

где  $x_f$  – текущая концентрация поглощаемого компонента или хемосорбента;

$L_{vj} = \int_0^{\xi} l(\xi) d\xi$  – расход жидкости в пленке.

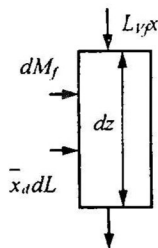


Рис. 11. Схема потоков в пленке высотой  $dz$ .

Средняя концентрация поглощаемого компонента в каплях, влетающих в пленку в выделенном элементе, при протекании химической реакции определяется соотношением:

$$\bar{x}_d = x_d + x_{B0}, \quad (24)$$

Количество компонента, поглощаемого элементом пленки жидкости, представлено функцией, зависящей от концентрации поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазах  $M_f(x_f, y) = \frac{dM_f}{G_v d\xi}$ , характер определения которой будет зависеть от значения  $x_f$ .

$$M_f(x_f, y) = N_{Gf}(y - mx_f), \text{ при } x_f > 0, \quad (25)$$

$$M_f(x_f, y) = N_{Gf}y, \text{ при } x_f < 0, \quad (26)$$

Окончательно уравнения для расчета концентраций  $CO_2$  в газовой и жидкой фазах запишутся в полном аппарате вихревого типа при протекании химической реакции без учета продольного перемешивания запишутся:

$$\begin{aligned} -\frac{dy}{d\xi} &= \frac{\rho_G}{\rho_L} \frac{L_m}{G_m} l(\xi)(x_d + x_{B0}) + M_f(x_f, y) \\ \frac{dx_f}{d\xi} &= \frac{1}{\xi} \int_0^\xi l(\xi) d\xi \left[ \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{G_m}{L_m} M_f(x_f, y) + l(\xi)(x_d + x_{B0} - x_f) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Система уравнений решается со следующими граничными условиями

$$\xi = 0, \quad y = y_0, \quad x_f = x_d + x_{B0} \quad (28)$$

Численное решение четырехшаговым методом Рунге-Кутты позволило определить значения технологической эффективности  $E_{TG} = \frac{y_0 - y_1}{y_0 - y^*(x_0)}$ , поглощаемого компонента в газовой фазе по высоте аппарата. Концентрация  $CO_2$  в газовой фазе на входе в аппарат  $y_0$  была принята равной  $0,002$  кмоль/м<sup>3</sup>. Концентрация диоксида углерода в жидкости  $x_0$ , поступающей на орошение аппарата, в расчетах равна нулю.

В результате численного исследования процесса хемосорбции было выявлено, что с увеличением отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз увеличивается как эффективность аппарата (рис. 12), так и средняя движущая сила. Увеличение эффективности поглощения диоксида углерода при протекании химической реакции, по сравнению с физической сорбцией, объясняется тем, что в аппарате вихревого типа исключается процесс десорбции из пристенной пленки жидкости. Поглощение пленкой жидкости происходит при большой движущей силе массообмена (относительное значение может достигать единицы).

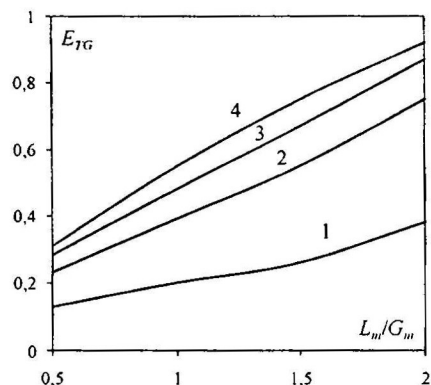


Рис. 12. Зависимость технологической эффективности от давления в газовой фазе и отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз,  $p$ , МПа: 1–0,1; 2–1; 3–2; 4–3.

На рисунке 13 представлена схема двухступенчатого процесса, в котором большинство  $CO_2$  улавливается в абсорбере 1 при использовании частично регенерируемого раствора МДЭА, а для тонкой очистки используется полностью восстановленный раствор МДЭА в абсорбере 2. Насыщенный раствор амина сначала регенерируется в колонне 3, работающей под высоким давлением, где десорбируются углеводороды, затем частично регенерируется для повышения эффективности горячий газ из десорбера 5 подается в десорбер 4. Часть раствора из десорбера 4 подается в десорбер 5, другая часть в абсорбер 2.

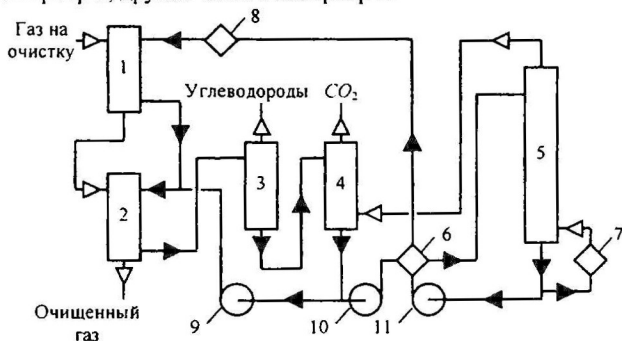


Рис. 13. Схема двухступенчатой очистки от  $CO_2$  водным раствором МДЭА: 1 – абсорбер грубой очистки, 2 – абсорбер тонкой очистки, 3, 4, 5 – десорберы, 6 – теплообменник, 7 – испаритель, 8 – холодильник, 9, 10, 11 – насосы.

Метод двухступенчатой очистки от диоксида углерода водным раствором МДЭА позволяет полностью использовать раствор МДЭА с минимальными его потерями.

## **ВЫВОДЫ**

1. Представлен анализ аппаратов для очистки газовых выбросов от диоксида углерода; отмечается, что наиболее перспективным типом аппаратов для реализации эффективной очистки крупнотоннажных газовых выбросов являются полые вихревые аппараты.
2. Исследован дисперсный состав жидкости, распыленной пористым вращающимся распылителем диаметром 50мм, со средним размером диспергирующих частиц 250 и 400 мкм при различных нагрузках по жидкости и числе оборотов ротора.
3. Выполнен комплекс теоретических исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в полых вихревых аппаратах с ПВР на основе закономерностей газодинамических характеристик и экспериментальных исследований дисперсной структуры жидкости, а также физических свойств взаимодействующих сред.
4. Произведена оценка механизма массопереноса в каплях жидкости в газожидкостном потоке в условиях физической сорбции диоксида углерода. Выявлено, что в каплях имеет место исключительно диффузионный механизм переноса массы, соответствующий модели Ньюмена.
5. Разработано математическое описание процесса хемосорбционной очистки газовых выбросов от диоксида углерода водным раствором метилдиэтанолamina.
6. Установлена адекватность предложенного математического описания процессу химической сорбции  $CO_2$  МДЭА.
7. Разработана инженерная методика проектирования и расчета аппарата с ПВР, обеспечивающая заданную степень очистки промышленных газов от диоксида углерода.
8. Представлен анализ методов очистки газовых выбросов от диоксида углерода; показана наибольшая экономическая целесообразность двухступенчатой очистки газовых выбросов водным раствором МДЭА.

## **Основные обозначения**

$W_{ax}$ ,  $W_{cp}$  – скорости газа на входе в аппарат и средняя по сечению аппарата, м/с;  $W_\phi$ ,  $W_r$ ,  $W_z$  – тангенциальная, радиальная и осевая скорости газа, м/с;  $U_\phi$ ,  $U_r$ ,  $U_z$ ,  $U_{отн}$  – тангенциальная, радиальная, осевая и относительная скорости капли, м/с;  $a$  – диаметр капли, мкм;  $n$  – число оборотов ПВР, об/мин;  $G_m$ ,  $L_m$  – массовые расходы газа и жидкости, кг;  $R_\phi$  – радиус рабочей зоны аппарата, м;  $R_p$  – радиус пористых вращающихся распылителей, м;  $\rho_L$ ,  $\rho_G$  – плотности жидкой и газовой фаз, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время полета капли, с;  $x$  – концентрация в жидкой фазе, кмоль/м<sup>3</sup>;  $y$  – концентрация в газовой фазе, кмоль/м<sup>3</sup>;  $\beta_L$ ,  $\beta_G$  – коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах;  $Sh$  – число Шервуда;  $Pr$  – число Прандтля;  $Sc$  – число Шмидта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $R$  – максимальный радиус зоны возмущения;  $T$  – время достижения радиуса возмущения максимального значения;  $\eta = r/R$  – безразмерный радиус зоны возмущения;  $\rho_L$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – доля энергии капли, пошедшая на диссипацию;  $\beta$  – коэффициент

массоотдачи без воздействия капель, м/с;  $\beta''$  – коэффициент массоотдачи с учетом воздействия капель, м/с.

Индексы: 0 – начальное значение;  $r$  – проекция на радиус;  $z$  – проекция на ось аппарата;  $\varphi$  – тангенциальная составляющая;  $L$  – жидкая фаза;  $G$  – газовая фаза;  $a$  – капля;  $f$  – пленка;  $m$  – массовый расход.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

**Научные статьи:**

1. Гумерова Г.Х. Динамика дисперсной фазы в вихревом аппарате с пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г.Х., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. // Химическая промышленность сегодня. -2009. - № 5. С.47-50.
2. Гумерова Г.Х. Очистка низконапорных газовых выбросов энергетических установок в аппаратах вихревого типа с пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г.Х., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. // Промышленная энергетика. – 2009. - № 6. С. 59-62.
3. Дмитриев А.В. Очистка газовых выбросов ТЭС от диоксида углерода в вихревых аппаратах с пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г.Х., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. //Проблемы энергетики. – 2009. - № 1-2. С.34-39.
4. Nikolaev N.A. Porous Rotary Liquid Sprayers Prayers for Cleaning gas Pollutions / Nikolaev N.A., Gumerova G.H., Dmitriev A.V. // Труды Академэнерго. – 2008. – № 4. С.37-42.
5. Гумерова Г.Х. Пористые вращающиеся распылители жидкости / Гумерова Г.Х., Николаев Н.А./ Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2007. – 25с. 10 ил. – Библиогр. 21 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ. № 38-B2008, 18.01.2008.
6. Гумерова Г.Х. Диспергирование жидкости пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г.Х., Николаев Н.А./ Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2007. – 19с. 10 ил. – Библиогр. 14 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ, № 19-B2008, 11.01.2007.
7. Гумерова Г.Х. Закономерности массопереноса между газом и жидкостью в аппаратах с пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г.Х., Николаев Н.А. / Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2008. – 19с. 10 ил. – Библиогр. 50 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ - № 103-B2008, 11.02.2007.
8. Гумерова Г.Х. Течение жидкости в пористых средах в центробежном поле / Гумерова Г.Х., Николаев Н.А./ Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2008. – 14с. 10 ил. – Библиогр. 40 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ - № 421-B2008, 19.05.2008.
9. Гумерова Г.Х. Исследование гидродинамики кольца жидкости на внутренней стенке пористого вращающегося распылителя / Гумерова Г.Х., Николаев Н.А./ Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2008. – 10с. 12 ил. – Библиогр. 18 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ – № 402-B2008, 19.05.2008.
10. Гумерова Г.Х. Динамика кольца жидкости на внутренней стенке пористого вращающегося распылителя / Гумерова Г.Х., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. /Нижекамский химико-технол. инст-т. Казан. гос. технол. ун-та. – Нижнекамск, 2008. – 17 с. – 9 ил. – Библиогр. 21 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ - № 869-B2008, 10. 11. 08.

Материалы конференций и патенты:

11. Гумерова Г.Х. Материалы V-й Международной научно-технической конференции «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2008)», г. Уфа, 2008;
12. Гумерова Г.Х. Материалы IX-й Международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии», г. Казань, 2008;
13. Гумерова Г.Х. Материалы Второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология», Казань, 2008.
14. Патент на полезную модель РФ Вихревое устройство с пористыми вращающимися распылителями /Гумерова Г.Х., Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. // Патент Российской Федерации № 76576. Опубликовано: 27.09.2008 Бюллетень № 27.

Соискатель

Г.Х. Гумерова

Заказ 292

Тираж 100 экз.

---

Офсетная лаборатория Казанского государственного технологического  
университета

420015, Казань, К.Маркса, 68